

熱力学的平衡計算を利用した焼却灰の一軸圧縮強さに及ぼす鉱物の影響評価

立命館大学 学生会員 ○筒井 祐貴
国立環境研究所 正会員 石森 洋行
立命館大学 正会員 建山 和由

1. はじめに

焼却灰の有効利用方法には、セメントの代替材や熔融スラグ化して土木資材として利用することが一般的であるが、セメントに対する需要の縮小や熔融炉の運転・維持に巨額を要すること、膨大な化石燃料の消費と温室効果ガスの排出のため、別の利用方法を検討する必要がある。焼却灰の化学組成はセメントに類似し、水を加えるとカルシウム Ca、硫酸 SO₄、アルミニウム Al からなるエトリンガイトと呼ばれる針状の結晶鉱物を形成し、焼却灰の一軸圧縮強さが増加するといわれている。従来より、この自硬性に着目して焼却灰そのものを土木資材として利用するための研究が行われてきたが、(1) 強度発現の要因であるエトリンガイト生成量と一軸圧縮強さの関係が定量的には明らかにされておらず、(2) 焼却灰中の化学物質濃度がどれだけあれば所要のエトリンガイト量を生成できるのかは明らかになっていない。本研究では、所定の養生日数を経た焼却灰の一軸圧縮強さを測定するとともに、その原因分析のためにエトリンガイト発生に寄与する化学物質量を溶出試験により測定し、その溶出量から生成が期待される鉱物発生量を熱力学的平衡計算により評価した。以上より、焼却灰が所要の一軸圧縮強さを得るための鉱物組成を調べた。

2. 実験内容・方法

2.1 使用材料

本研究に用いた試料は、焼却施設より採取した(1) S 焼却灰（産業廃棄物）、(2) O 焼却灰（一般廃棄物）、(3) K 焼却灰（医療系廃棄物）である。また対照として(4) 製鋼スラグ、(5) 真砂土、(6) ベントナイトを用いた。表-1 に試料特性を整理した。化学組成は波長分散型蛍光 X 線分析装置を用いて測定した。酸化率は、既往研究によれば、その値が小さいほど一軸圧縮強さは高いといわれている。

2.2 焼却灰の一軸圧縮試験

高さ 10 cm、直径 5 cm のプラスチック製モールドに焼却灰と製鋼スラグを所定の含水比および乾燥密度で供試体を作製し、脱型後パラフィルムで全体を巻いた後、それをプラケースに入れて所定期間養生した。養生日数は 1, 7, 28, 56, 91, 365 日である。養生期間中は濡れたキムタオルで供試体を覆い高湿度を保つことで、養生中の供試体からの水分蒸発を防いだ。所定の養生日数後に JIS A 1216 に従い一軸圧縮強さを調べた。

2.3 溶出試験

焼却灰や製鋼スラグに含まれる化学物質、特にエトリンガイト生成に寄与する成分（Ca、SO₄、Al）が含まれているか否かを調べるために、環境省告示第 18 号溶出試験を行った。粒径 2 mm 以下に調整した焼却灰 50 g に対してその 10 倍量の超純水をポリ容器に入れ 200 rpm で振とうし、その 6 時間後の溶出液に含まれる化学物質濃度を測定した。無機元素については ICP 発光分析装置を用いて、硫酸等のイオンは分光光度計を用いて測定した。

2.4 熱力学的平衡計算

焼却灰や製鋼スラグから溶出する化学物質から期待されるエトリンガイト等の鉱物生成量を熱力学的平衡計算用ソフトウェア phreeqc を用いて計算した。データベースには minteq.v4 を用いた。入力条件には焼却灰の溶出

表-1 試料特性

		試験方法	使用した試料					
			S 焼却灰	O 焼却灰	K 焼却灰	製鋼スラグ	真砂土	ベントナイト
土粒子密度 (kg/m ³)		JIS A 1202	2610	2680	2590	3430	2640	2900
自然含水比 (%)		JIS A 1203	0.14	58.6	40.9	8.85	0.01	6.98
強熱減量 (%)		JIS A 1226	0.25	16.9	15.2	3.98	1.40	5.03
化学組成 (%)	SiO ₂	XRF	69.3	22.4	29.2	65.3	65.3	71.7
	Al ₂ O ₃		12.2	17.6	13.7	19.4	19.4	17.2
	Fe ₂ O ₃		4.1	7.2	4.4	3.1	3.1	4.6
	CaO		5.6	33.9	21.0	3.0	3.0	1.1
	MgO		2.4	3.0	2.8	0.4	0.4	2.0
酸化率 (%)			671	91	152	25.8	173	43.5

ここで、酸化率は (SiO₂+Al₂O₃) / (Fe₂O₃ + CaO + MgO) として計算した。

キーワード 焼却灰, エトリンガイト, 溶出量, 一軸圧縮強さ, 熱力学的平衡計算
連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学大学院 理工学研究科 Tel:077-561-2666

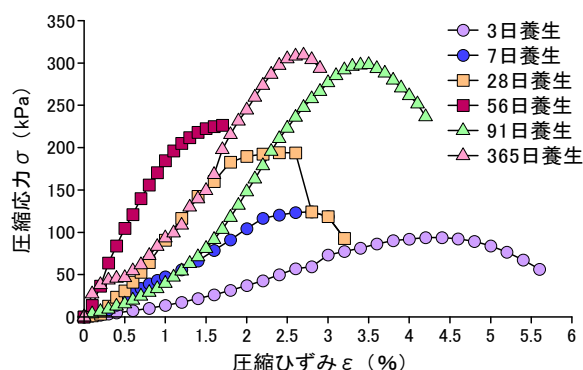


図-1 0 焼却灰に関する応力ひずみ曲線

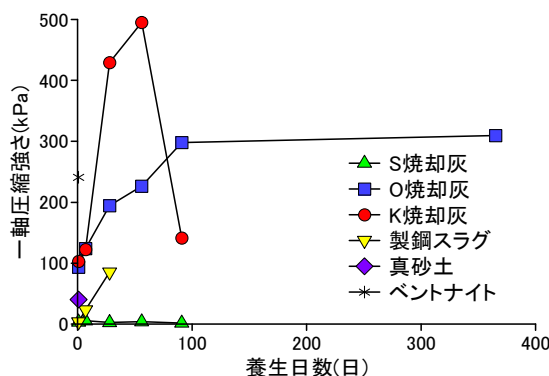


図-2 一軸圧縮強さと養生日数の関係
(養生 365 日目の S, K 焼却灰は破損のため測定不可)

表-2 溶出試験の結果

	単位	S 焼却灰	O 焼却灰	K 焼却灰	製鋼スラグ [※]
pH	—	9.6	12.1	10.6	12.5
電気伝導度	mS/m	10.5	434	758	792
Ca	mg/L	15.8	31.2	764	794
Al	mg/L	0.36	12.6	0.54	0.09
SO ₄	mg/L	< 5.0	118	420	6.89
Mg	mg/L	0.85	ND	0.29	ND
Ca/Al	—	43.9	2.5	1410	8822
Ca/SO ₄	—	3.2	0.3	1.8	115

※ND:検出下限値<0.01mg/L以下

表-3 熱力学的平衡計算による解析条件と結果

	単位	S 焼却灰	O 焼却灰	K 焼却灰	製鋼スラグ [※]
含水比	%	19.6	44.2	41.3	16.2
乾燥密度	kg/m ³	1640	1140	1190	1958
エトリンガイト	mg/kg, (%)	29.5, (8.5)	1130, (45.2)	190, (0.85)	49.9, (0.1)
Ca(OH) ₂	mg/kg, (%)	289, (83.4)	932, (37.1)	21300, (94.6)	36300, (99.9)
CaSO ₄ ・2H ₂ O	mg/kg, (%)	0, (0)	0, (0)	1020, (4.5)	0
AlO(OH)	mg/kg, (%)	7.6, (2.2)	447, (17.8)	0, (0)	0
Mg(OH) ₂	mg/kg, (%)	20.5, (5.91)	0, (0)	10.4, (0.05)	0
一軸圧縮強さ	kPa	5.3	310	495	84.9

※括弧内の数字は構成比を表わす

組成や供試体作製時の含水比、乾燥密度を考慮し、これらの入力値をもとに Ca, Al, SO₄ から発生し得る鉱物としてエトリンガイト 3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O や水酸化カルシウム Ca(OH)₂、石膏 CaSO₄・2H₂O、ベーマイト AlO(OH)等の各鉱物生成量を解析した。

3. 結果

図-1 に O 焼却灰に関する応力ひずみ曲線を示す。最も大きく強度が発現した 365 日養生では 3 日養生と比べ、圧縮ひずみが小さくなり、ピーク時の応力（一軸圧縮強さ）が増加していることから、養生日数とともに焼却灰の固化反応が生じていることがわかる。図-2 に各焼却灰と製鋼スラグ、真砂土、ベントナイトにおける一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す。O 焼却灰は養生日数 91 日以降では一軸圧縮強さに変化は無く、焼却灰中の固化反応は終了したと考えられる。

溶出試験の結果を表-2、各焼却灰中のエトリンガイト等の生成量を熱力学的平衡計算で計算した結果を表-3 に示す。K 焼却灰と製鋼スラグから生成する鉱物の約 95-99%が水酸化カルシウムであることから、両者の一軸圧縮強さは水酸化カルシウムの影響によるものと考えられ

る。その一方で S 焼却灰もまた水酸化カルシウムの割合が 83.4%であり支配的であるものの、絶対量が K 焼却灰より約 1/100 倍と少ないため大きな一軸圧縮強さが得られなかったものと考えられる。O 焼却灰では、水酸化カルシウム生成量は S 焼却灰の 4 倍程度であるが、一軸圧縮強さは 60 倍もの高い強度を得た。これはエトリンガイトの方が一軸圧縮強さに及ぼす影響は強いことを示唆している。表-2, 3 から Al や SO₄ に対して Ca の溶出量が多い焼却灰には水酸化カルシウムが多く生成し、Ca の溶出量が相対的に少なければエトリンガイトを生成しより大きな一軸圧縮強さを発現し得る。

4. 結び

焼却灰の一軸圧縮強さはエトリンガイトの影響が大きいと示唆される。今後は示差熱分析を用いた鉱物生成量の実測し検証を行う予定である。

謝辞：本研究は、一般財団法人レントオール奨学財団の助成を受けて実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 土居洋一他：一般廃棄物焼却灰の土質特性の経時変化、土木学会論文集, Vol.659/III-52, pp.103-112